

PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM

Internationales Büro

INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)



(S1) Internationale Patentklassifikation⁶:

G01F

A2

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 99/27325

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum:

3. Juni 1999 (03.06.99)

(21) Internationales Aktenzeichen:

PCT/DE98/03444

(22) Internationales Anmeldedatum:

23. November 1998
(23.11.98)

(81) Bestimmungsstaaten: JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

(30) Prioritätsdaten:

197 52 208.4

25. November 1997 (25.11.97) DE

Veröffentlicht

Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): ROBERT BOSCH GMBH [DE/DE]; Postfach 30 02 20, D-70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): HEYERS, Klaus [DE/DE]; Robert-Koch-Strasse 37, D-72766 Reutlingen (DE). FREY, Wilhelm [DE/DE]; Sophienstrasse 13, D-70178 Stuttgart (DE).

(54) Title: THERMAL MEMBRANE SENSOR AND METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

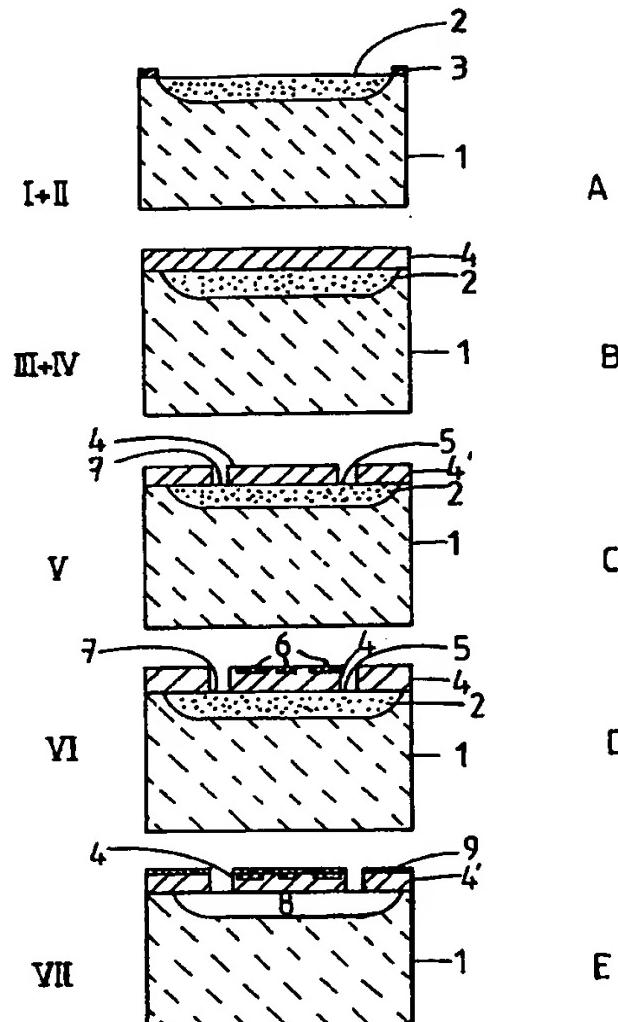
(54) Bezeichnung: THERMISCHER MEMBRANSENSOR UND VERFAHREN ZU SEINER HERSTELLUNG

(57) Abstract

The invention relates to a method for producing a membrane sensor, especially a thermal membrane sensor, over a silicon substrate (1). A thin layer (4) comprised of silicon carbide or silicon nitride is deposited over an area (2) made of porous silicon which is configured in the surface of the substrate (1). Openings (5, 7) are then formed in said silicon carbide or silicon nitride layer (4), said layer extending to the porous silicon layer (2), by means of a dry etching method. Afterwards, semiconductor and circuit-board structures (6) are implanted in the upper surface of the membrane layer (4) by means of lithographic steps and the sacrificial layer (2) comprised of porous silicon is then removed by a suitable solvent, for example ammoniac. As a result, a cavity (8) is produced underneath the membrane layer (4) which thermally decouples the sensor membrane from the substrate (1).

(57) Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Membransensors über einem Siliziumsubstrat (1) insbesondere eines thermischen Membransensors. Eine dünne Schicht (4) aus Siliziumcarbid oder Siliziumnitrid wird über einem in der Oberfläche des Substrats (1) ausgebildeten Bereich (2) aus porösem Silizium abgeschieden, und anschliessend durch ein Trockenätzverfahren Öffnungen (5, 7) in dieser Siliziumcarbid- oder Siliziumnitridschicht (4) gebildet, die bis zur porösen Siliziumnitridschicht (2) reichen. Anschliessend werden durch lithographische Schritte Halbleiter- und Leiterbahnstrukturen (6) in die obere Oberfläche der Membranschicht (4) implantiert und dann die Opferschicht (2) aus porösem Silizium mit einem geeigneten Lösungsmittel, wie z.B. Ammoniak, entfernt. Dadurch entsteht unterhalb der Membranschicht (4) ein Hohlraum (8), der die Sensormembran vom Substrat (1) thermisch entkoppelt.



LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		

5 THERMISCHER MEMBRANSENSOR UND VERFAHREN ZU SEINER
 HERSTELLUNG

Hintergrund der Erfindung

10 Die Erfindung befaßt sich mit einem Verfahren zur Herstellung eines thermischen Membransensors über einem Siliziumsubstrat nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und mit nach diesem Verfahren hergestellten Membran-
15 sensoren. Ein solches Verfahren und solche Membransensoren sind aus "ITG-Fachbericht 126: Sensoren-Technologie und Anwendung", S. 285-289 bekannt.

Allgemeiner Stand der Technik

20 Über einem Siliziumsubstrat abgeschiedene dünne Schichten, insbesondere Siliziumschichten, unter denen sich ein Abstand haltender freier Raum befindet und die somit als Membran fungieren, werden in der Technik für verschiedene Zwecke verwendet. Ein Einsatzgebiet solcher Membranbauteile besteht bei Sensoren und hier insbesondere bei thermischen Membransensoren, mit denen physikalische Größen, z.B. ein Massenfluß, durch Erfassung einer Temperaturänderung in der dünnen Membranschicht erfaßbar sind.

30 Wichtig ist bei solchen thermischen Sensoren, daß die dünne Membranschicht möglichst gut thermisch vom Substrat entkoppelt ist. In konventionellen Technologien zur Herstellung von Flußsensoren oder Strahlungsdetektoren wird dazu beispielsweise als Sensorträger eine dünne Membran durch anisotropes Rückseitenätzen eines Siliziumwafers

erzeugt. Zur Maskierung wird eine doppelseitige Lithographie eingesetzt, was nur durch einen erhöhten apparativen Aufwand möglich ist. Außerdem bilden die tiefen Ätzgruben durch den ganzen Wafer eine mechanische Schwachstelle, die bei einer späteren Weiterverarbeitung desselben zu großer Vorsicht zwingt, um die Waferplatte nicht zu zerbrechen. Da die Ätzstoppebenen schräg im Kristall verlaufen, ist die Öffnung auf der Rückseite größer als auf der Vorderseite. Dadurch erhöht sich die notwendige Waferfläche pro Sensor beträchtlich. Zusätzlich kann die Verwendung komplizierter Schichtpakete aus Metall und Isolatoren auf der Silizium-Membran große Probleme hinsichtlich einer Drift der Schichten und der Langzeitstabilität, z.B. durch Ablösung der Schichten voneinander, hervorrufen.

Der oben erwähnte ITG-Fachbericht 126 vermeidet diese Probleme durch die Anwendung der Technologie des porösen Siliziums. Im einzelnen weist dieses Verfahren folgende Schritte auf:

- I Ausbildung einer einen Bereich auf dem Silizium-substrat, in dem die Membran gebildet werden soll, freilassenden Ätzmaske auf einer Hauptfläche des Substrats;
- II elektrochemisches Ätzen des freiliegenden Substratbereichs bis in eine bestimmte Tiefe unter Bildung von porösem Silizium innerhalb des freiliegenden Bereichs;
- III Entfernen der Maske;
- IV Abscheiden einer dünnen Membranschicht aus Siliziumcarbid oder -nitrid;
- V Öffnen vorbestimmter Bereiche in der Membranschicht aus Siliziumcarbid oder -nitrid von ihrer oberen Oberfläche her;
- VI Selektive Ausbildung von Schaltungsstrukturen auf der oberen Oberfläche der Membranschicht, und

VII Entfernen der porösen Siliziumschicht (2) unter der Membranschicht durch Opferschichtätzung.

Allerdings sind die Schaltungsstrukturen bei dem bekannten
5 thermischen Membransensor durch Sputtern von Metallatomen auf der oberen Oberfläche der Membran abgeschieden worden und dadurch empfindlich gegen äußere mechanische und chemische Einflüsse.

10 Kurzfassung der Erfindung

Angesichts des oben Gesagten ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung eines thermischen Membransensors mit Hilfe der Technologie des porösen Siliziums und 15 einen mit diesem Verfahren hergestellten thermischen Membransensor für die Erfassung von Massenflüssen so zu ermöglichen, daß sich die Schaltungsstruktur des thermischen Membransensors mit Oberflächen-Mikromechanikprozessen so herstellen läßt, daß dessen aktive Fläche 20 einen großen Substratabstand hat und die Schaltungselemente gegen äußere mechanische und chemische Beeinflussung weitgehend geschützt sind.

Die obige Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die in den 25 beiliegenden Patentansprüchen enthaltenen Merkmale gelöst.

Insbesondere ist ein solches Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß in Schritt VI die Schaltungsstrukturen in die obere Oberfläche der Membranschicht implantiert 30 werden.

Somit wird mit Hilfe der Technologie des porösen Siliziums die Möglichkeit geboten, kostengünstig und schnell eine Siliziumcarbid- oder Siliziumnitrid-Membran über dem 35 Siliziumsubstrat zu erzeugen und anschließend erfindungsgemäß durch maskierte Dotierung einen thermoresistiven oder

thermoelektrischen Sensor so herzustellen, daß dessen Schaltungsstrukturen weitgehend gegen äußere mechanische und chemische Einflüsse geschützt sind.

5 Jedoch ist der erfindungsgemäße Prozeß nicht nur zur Herstellung eines thermischen Membransensors geeignet, sondern für jede Art von dünne, über einem Siliziumsubstrat freiliegende Membranen verwendende Elemente, z.B. auch für die Herstellung von Aktoren, die eine durch Druck oder
10 Unterdruck ausgelenkte Membran enthalten. Die mit dem Verfahren erreichbare Membrandicke liegt in einem Bereich von einigen 10 bis einige 100 nm.

Bevorzugt wird die poröse Siliziumschicht im Silizium-
15 substrat durch einen elektrochemischen Anodisierungsprozeß in Flußsäureelektrolyt gebildet. Die darüber abgeschiedene Schicht aus Siliziumcarbid oder Siliziumnitrid wird bevorzugt durch einen Niedertemperatur-LPCVD- oder -PECVD- Prozeß gebildet. Alternativ kann solch eine dünne Schicht
20 auch durch einen reaktiven Sputter-Prozeß abgeschieden werden. Hier ist hervorzuheben, daß eine Siliziumcarbid- schicht hinsichtlich ihrer größeren mechanischen und chemischen Festigkeit bzw. Widerstandsfähigkeit zu bevorzugen ist. Bei der anschließenden lithographischen
25 Strukturierung werden die Öffnungen in der Siliziumcarbid- oder -nitridschicht bevorzugt durch einen Trockenätzprozeß, z.B. in einem Plasmaätzer gebildet. Durch einen weiteren Lithographieschritt werden nun die gewünschten Leiterbahnen für die thermoresistiven Elemente (Heizer und Sensor)
30 definiert und in wenigstens einem Implantationsschritt erzeugt. Die Leiterbahnen werden beispielsweise aus Aluminium gebildet.

Auf diese Weise läßt sich ohne störanfällige
35 Zwischenschicht die thermoresistive Einheit direkt in der oberen Oberfläche der Membran mit Hilfe einer Oberflächen-

Mikromechanik derart ausbilden, daß der thermische Sensor CMOS-kompatibel und gegen äußere chemische und mechanische Einflüsse unempfindlich ist.

- 5 Alternativ zu einem thermischen Membransensor, bei dem das Meßsignal durch thermoresistive Meßelemente erzeugt wird, kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren auch ein thermischer Membransensor hergestellt werden, der den thermoelektrischen Effekt ausnutzt, indem eine Thermosäule
10 aus zwei verschiedenen Stoffen mit großem Seebeck-Effekt, wie z.B. Antimon/Wismuth oder Silizium/Aluminium, in die obere Oberfläche der Membran implantiert wird. Dabei wird nach einer weiteren Lithographie eine zusätzliche Implantation durchgeführt.
- 15 Zum zusätzlichen Schutz vor Verschmutzungen, die eine Funktionsbeeinträchtigung des Sensors hervorrufen können, kann eine dünne ganzflächige Schutzschicht aus Siliziumcarbid oder Siliziumnitrid aufgebracht werden.
- 20 Ferner kann das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren auch zur Herstellung eines als Strahlungssensor (Bolometer) eingesetzten thermischen Membransensors verwendet werden. Hierzu wird eine zusätzliche Absorberschicht aufgebracht,
25 die beispielsweise aus schwarzem Gold oder schwarzem Silizium besteht. Schwarzes Gold zeigt eine breitbandige starke Absorption von ca. 98% und wird durch thermisches Verdampfen von Gold in einer Niederdruck-Stickstoffatmosphäre erzeugt. Schwarzes Silizium wird nach der
30 Deposition beispielsweise in einem Plasmaätzer durch geeignete Prozeßführung erzeugt.

Schließlich wird das poröse Silizium, das bislang als Stützmaterial und Unterlage für die dünne Membranschicht gedient hat, in einem geeigneten Lösungsmittel, wie z.B. Ammoniak entfernt. Dadurch wird die Sensormembran

freigelegt und ist damit vom Substrat thermisch entkoppelt. Hier ist anzumerken, daß poröses Silizium eine im Vergleich zum Edukt extrem vergrößerte Oberfläche besitzt. Das Verhältnis der Oberfläche von nanoporösem Silizium zur 5 Oberfläche von Bulksilizium beträgt etwa 10^6 .

Das oben geschilderte erfindungsgemäße Verfahren macht es erstmals möglich, einen thermischen Sensor in Oberflächen-Mikromechanik CMOS-kompatibel herzustellen, dessen aktive 10 Fläche aufgrund der verwendeten Technologie des porösen Siliziums einen sehr großen Substratabstand und somit eine weitgehende thermische Entkopplung vom Substrat besitzt. Das Trägermaterial der Membran, insbesondere Silizium-carbid, ist chemisch und mechanisch sehr widerstandsfähig.

15 Durch die besonders einfache Prozeßschrittfolge und den im Vergleich zu herkömmlichen Strukturierungsschritten (z.B. mit KOH) geringen Waferflächenverbrauch kann die Herstellung eines thermischen Membransensors sehr 20 kostengünstig ausgeführt werden. Sämtliche Prozeßschritte sind in der Halbleiterfertigung verfügbar.

Eine bevorzugte Ausführungsform der Prozeßschritte der 25 erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens wird nachstehend anhand der beiliegenden Zeichnung näher beschrieben.

Die Zeichnungsfiguren 1A-1E zeigen einzelne Prozeßschritte eines bevorzugten Ausführungsbeispiels in Form eines schematischen Querschnitts durch einen Waferbereich, in dem 30 ein thermischer Membransensor gebildet wird.

Fig. 1A zeigt Prozeßschritte I und II, durch die zunächst auf einer oberen Oberfläche eines entsprechend vorbehandelten Substratblocks 1 eine Ätzmaske 3 in Form eines Photolacks aufgebracht wird, der dann in einem 35 Bereich, in dem eine Membran gebildet werden soll,

belichtet und anschließend entfernt wird (Schritt I). Dann wird durch elektrochemische Anodisierung in einem Flußsäure-Elektrolyten das maskierte Substrat 1 bis in eine definierte Tiefe lokal porös geätzt, wodurch eine Schicht 2 aus porösem Silizium gebildet wird (Schritt II).

Fig. 1B zeigt, daß über der Schicht 2 aus porösem Silizium nach Entfernen der Maske 3 eine dünne Membranschicht 4 aus Siliziumcarbid oder -nitrid insbesondere bevorzugt aus Siliziumcarbid entweder durch einen Niedertemperatur-LPCVD-Prozeß oder einen Niedertemperatur-PECVD-Prozeß oder durch reaktives Sputtern abgeschieden wird (Schritte III und IV).

Anschließend wird, wie Fig. 1C zeigt, die obere Oberfläche der dünnen Membranschicht 4 lithographisch strukturiert und die Membranschicht 4 durch ein Trockenätzverfahren, z.B. in einem Plasmaätzer, geöffnet, wodurch Öffnungen 5, 7 entstehen, die durch die Membranschicht 4 bis zur porösen Siliziumschicht 2 reichen (Schritt V). Selbstverständlich steht die Membran, der in Fig. 1C zu erkennende mittlere Bereich der Schicht 4, durch Brücken mit dem peripheren Bereich 4' der Membranschicht in Verbindung.

Gemäß Fig. 1D werden nun durch einen weiteren Lithographieschritt die gewünschten Halbleiter- und Leiterstrukturen bzw. Bahnen für die thermoresistiven Elemente, insbesondere Heizer und Sensor definiert, und in einem Implantationsschritt in die obere Oberfläche der Membranschicht 4 implantiert (Schritt IV). Zur Implantation von Leiterbahnen eignet sich besonders Aluminium. Selbstverständlich lassen sich auch thermoresistive Elemente in Form einer Thermosäule durch Implantation zweier verschiedener Stoffe mit großem Seebeck-Effekt in der oberen Oberfläche der Membran 4 bilden. Solche Stoffe sind z.B. Antimon/Wismuth und Silizium/Aluminium. Dabei

wird nach einem weiteren Lithographieschritt eine zusätzliche Implantation durchgeführt.

- Anschließend kann, wenn dies erforderlich ist, zum Schutz
5 vor Verschmutzungen, die eine Funktionsbeeinträchtigung des
Sensors hervorrufen können, eine zusätzliche dünne
ganzflächige Schutzschicht 9 aus Siliziumcarbid oder
Siliziumnitrid aufgebracht werden.
- 10 Wenn der thermische Membransensor als Strahlungsmesser
(Bolometer) verwendet wird, wird eine zusätzliche (in der
Figur nicht gezeigte) Absorberschicht, z.B. aus schwarzem
Gold, aufgebracht. Anschließend wird gemäß Fig. 1E durch
einen abschließenden Prozeßschritt VII die Opferschicht 2
15 aus porösem Silizium mit Hilfe eines geeigneten
Lösungsmittels, wie z.B. Ammoniak, entfernt. Dadurch wird
die Sensormembran 4 freigelegt, und durch den darunter
entstandenen Hohlraum ist die thermische Entkopplung der
Membran und der thermoresistiven Elemente 6 von dem
20 Substrat 1 erreicht.

5

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Herstellung einer dünnen freiliegenden Membran über einem Siliziumsubstrat (1) insbesondere für einen thermischen Membransensor mit folgenden Schritten:
 - 10 I Ausbildung einer einen Bereich auf dem Siliziumsubstrat (1), in dem die Membran gebildet werden soll, freilassenden Ätzmaske auf einer Hauptfläche des Substrats;
 - II elektrochemisches Ätzen des freiliegenden Substratbereichs bis in eine bestimmte Tiefe unter Bildung von porösem Silizium (2) innerhalb des freiliegenden Bereichs;
 - III Entfernen der Maske;
 - IV Abscheiden einer dünnen Membranschicht (4) aus Siliziumcarbid oder -nitrid;
 - 20 V Öffnen vorbestimmter Bereiche (5, 7) in der Membranschicht (4) aus Siliziumcarbid oder -nitrid von ihrer oberen Oberfläche her;
 - VI Selektive Ausbildung von Schaltungsstrukturen (6) auf der oberen Oberfläche der Membranschicht (4), und
 - 25 VII Entfernen der porösen Siliziumschicht (2) unter der Membranschicht (4) durch Opferschichtätzung, dadurch gekennzeichnet, daß in Schritt VI die Schaltungsstrukturen in die obere Oberfläche der Membranschicht implantiert werden.
- 30
35 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Ätzschritt II zur Bildung der porösen Siliziumschicht (2) einen elektrochemischen Anodisierungsprozeß in Flußsäureelektrolyt aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Abscheideschritt IV einen Nieder-temperatur-LPCVD- oder -PECVD-Prozeß aufweist.
- 5 4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die dünne Siliziumcarbid- oder -nitridmembranschicht (4) in Schritt IV durch reaktives Sputtern abgeschieden wird.
- 10 5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Öffnungen (5, 7) in der Siliziumcarbid- oder -nitridmembranschicht in Schritt V durch einen Trockenätzprozeß gebildet werden.
- 15 6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Trockenätzprozeß im Schritt V durch Plasmaätzung erfolgt.
- 20 7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die im Schritt VI ausgebildeten Schaltungsstrukturen (6) Leiterbahnen aus Aluminium enthalten.
- 25 8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die im Schritt VI ausgebildeten Schaltungsstrukturen (6) Halbleiterelemente enthalten.
- 30 9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Opferschichtätzung in Schritt VII z.B. mit Ammoniak, KOH oder Tetramethylammoniumhydroxid ausgeführt wird.
- 35 10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein zusätzlicher Schritt eine dünne ganzflächige Schutzschicht (9) auf der oberen Oberfläche der Membran (4) aufbringt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die dünne ganzflächige Schutzschicht (9) auf der oberen Oberfläche der Membran Siliziumcarbid oder Siliziumnitrid 5 aufweist.
12. Thermischer Membransensor, hergestellt mit dem Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche.
- 10 13. Thermischer Membransensor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die in der oberen Oberfläche der Membran implantierten Schaltungsstrukturen eine Thermosäule aus zwei verschiedenen Stoffen mit großen Seebeck-Effekt aufweisen.
- 15 14. Thermischer Membransensor nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß er als Strahlungssensor ausgebildet ist und eine zusätzliche, über der dünnen ganzflächigen Schutzschicht (9) ausgebildete Absorberschicht aufweist.
- 20 15. Thermischer Membransensor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die zusätzliche Absorberschicht z.B. aus schwarzem Gold oder schwarzem Silizium besteht.

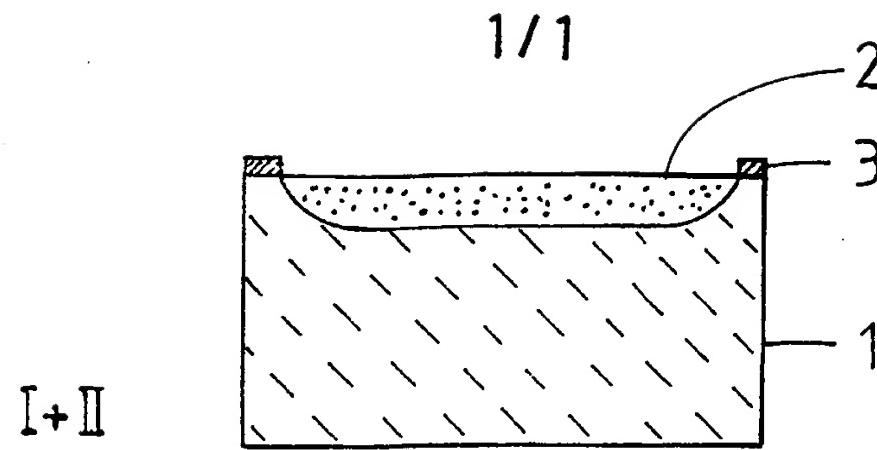


FIG. 1A

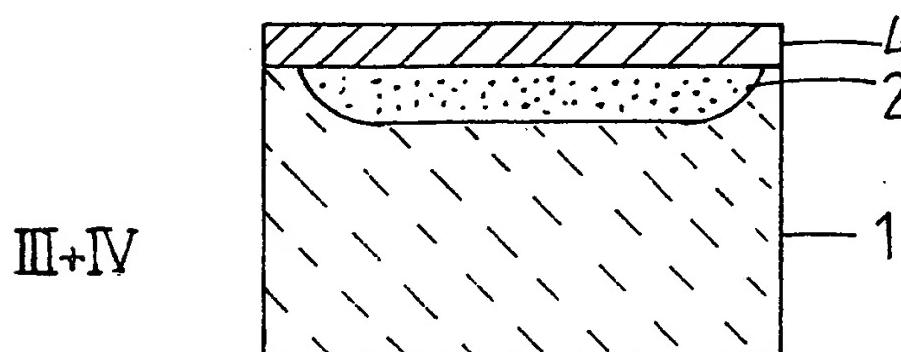


FIG. 1B

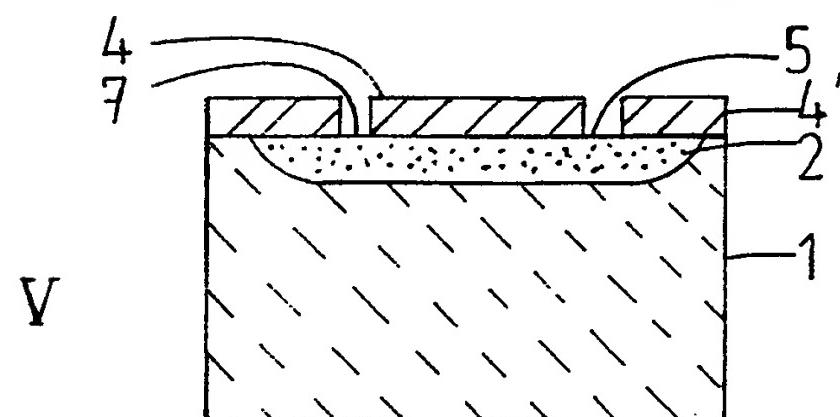


FIG. 1C

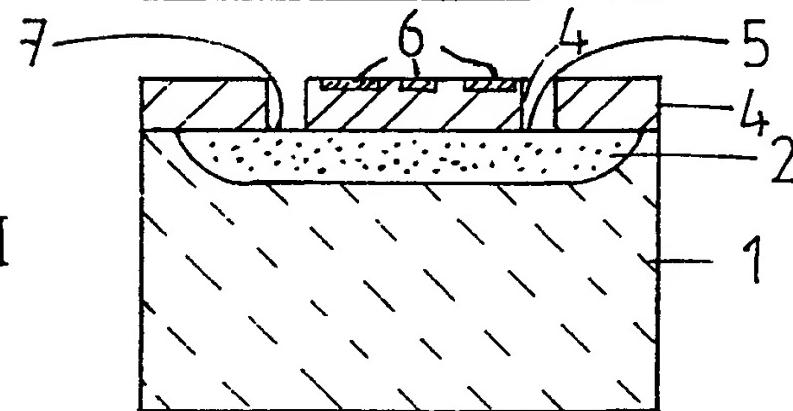


FIG. 1D

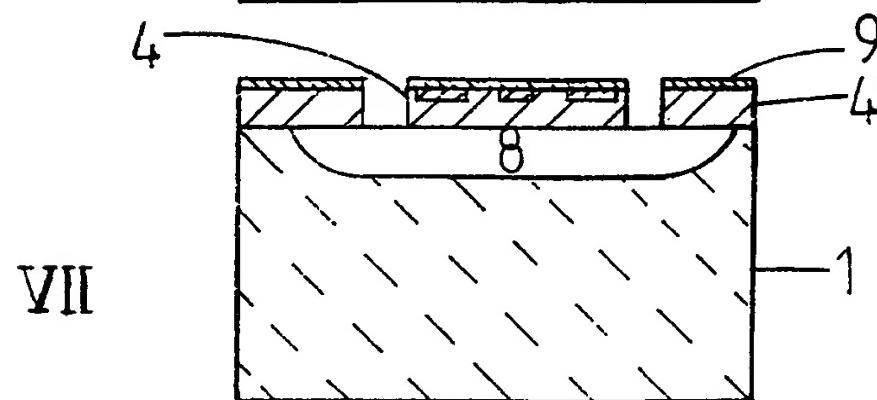


FIG. 1E